

# Perbandingan Kinerja *Generalized Frequency Division Multiplexing* Menggunakan Modulasi QAM dan Offset QAM

Ari Endang Jayati<sup>1</sup>, Budiani Destyningtias<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Semarang, Jl. Soekarno Hatta, Semarang, 50196 INDONESIA (tel: 024-6702757; fax: 024-67022722; email: <sup>1</sup>ariendang@usm.ac.id, <sup>2</sup>destyningtias@usm.ac.id)

[Diterima: 21 Januari 2022, Revisi: 25 November 2022]

Corresponding Author: Ari Endang Jayati

**INTISARI** — *Generalized frequency division multiplexing* (GFDM) merupakan sistem *multicarrier* masa datang yang bersifat nonortogonal. GFDM merupakan teknik transmisi data berbentuk blok yang setiap *subcarrier*-nya dibentuk dari pulsa berbentuk *nonrectangular*. Penerapan *quadrature amplitude modulation* (QAM) *mapping* untuk GFDM sangat baik karena meningkatkan efisiensi spektrum. QAM juga memiliki keterbatasan, yaitu meningkatnya kompleksitas ketika diimplementasikan. Selain itu, *inter-carrier interference* (ICI) juga masih ada dan sangat berpengaruh terhadap sistem. Untuk melakukan mitigasi terhadap kelemahan itu, digunakan teknik *offset QAM* (OQAM) *mapping*. Kelebihan GFDM/OQAM dibandingkan GFDM/QAM adalah komponen *quadrature* dan *in-phase* pada modulasi OQAM tidak mengalami pergeseran pada slot waktu yang sama, *out of band* (OOB) yang rendah, pesat data yang tinggi, dan bebas ICI. Makalah ini membandingkan dua skenario, yaitu sistem GFDM/OQAM dan sistem GFDM/QAM. Penelitian ini menganalisis kinerja *bit error rate* (BER) jika sinyal dilewatkan saluran *additive white Gaussian noise* (AWGN) dan saluran Rayleigh. Hasil simulasi menunjukkan bahwa GFDM/OQAM mempunyai kinerja lebih bagus. Hasil simulasi menunjukkan bahwa agar diperoleh BER  $10^{-2}$ , terjadi penurunan nilai rasio energi per bit terhadap daya derau ( $E_b/N_0$ ) sebanyak 8 dB pada modulasi QAM ke OQAM ketika dilewatkan kanal AWGN. Sementara itu, ketika dilewatkan kanal Rayleigh, untuk mendapatkan nilai BER  $10^{-2}$ , terjadi penurunan nilai  $E_b/N_0$  sebanyak 9 dB pada modulasi QAM ke OQAM. Selain itu, penelitian ini juga telah berhasil menyelidiki kinerja kedua sistem untuk parameter diagram konstelasi dan spektrum sinyal. Penelitian ini berhasil mendapatkan acuan nilai *roll-off factor* yang dapat digunakan pada penerapan sistem GFDM/OQAM dengan hasil kinerja terbaik yaitu 0,3. Faktor nilai *roll-off factor* sangat memengaruhi kinerja pada sistem GFDM.

**KATA KUNCI** — GFDM, ICI, Nonortogonal, OQAM, QAM.

## I. PENDAHULUAN

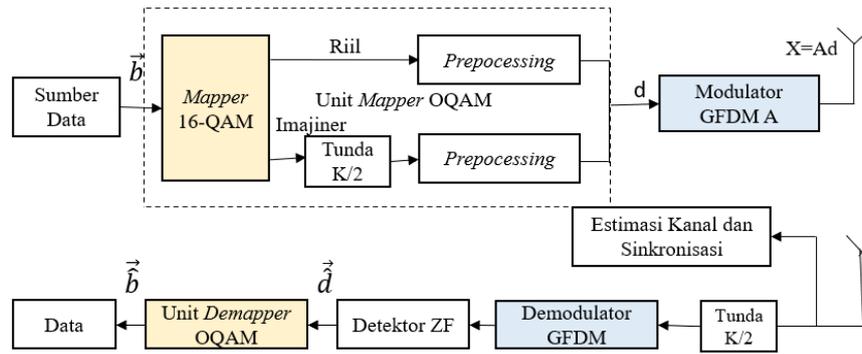
Aplikasi teknologi komunikasi nirkabel masa mendatang membutuhkan efisiensi spektrum yang tinggi, pesat data (*data rate*) yang tinggi, dan kompleksitas yang rendah. Contoh aplikasi tersebut antara lain *machine to machine* (M2M) dan *internet of things* (IoT). Saat ini, teknik *multicarrier* yang diterapkan adalah *orthogonal frequency division multiplexing* (OFDM). OFDM memiliki beberapa kekurangan, antara lain nilai *out of band* dan *peak average power ratio* (PAPR) yang tinggi. Nilai OOB dan PAPR yang tinggi akan mengakibatkan pemotongan pada sinyal masukan, sehingga sinyal informasi mengalami distorsi. Keterbatasan ini mengakibatkan perlunya dilakukan penelitian kandidat *multicarrier* lain yang memenuhi persyaratan aplikasi masa datang tersebut.

Untuk mengatasi masalah di atas, diusulkan sistem *multicarrier generalized frequency division multiplexing* (GFDM). GFDM merupakan sistem *filtered-multicarrier* nonortogonal yang setiap *subcarrier*-nya dibentuk dari pulsa berbentuk *nonrectangular*. GFDM didasarkan pada modulasi berupa blok yang independen, dengan setiap blok dibagi menjadi beberapa subsymbol dan *subcarrier*. Setiap *subcarrier* disaring dengan filter prototipe yang digeser secara sirkular di domain frekuensi dan waktu [1].

GFDM umum menggunakan modulasi QAM. Modulasi *quadrature amplitude modulation* (QAM) akan meningkatkan efisiensi spektrum sinyal. Namun, QAM juga mempunyai keterbatasan, yaitu masih adanya *inter-carrier interference* (ICI) dan tingginya kompleksitas dalam implementasinya [2]. Metode mitigasi keterbatasan tersebut adalah dengan pemetaan

(*mapping*) *offset QAM* (OQAM). Pada modulasi QAM terjadi lompatan fase  $180^\circ$ , sedangkan pada modulasi OQAM terjadi pergeseran fase  $90^\circ$ . Komponen *quadrature* dan *in-phase* pada modulasi OQAM tidak mengalami pergeseran pada slot waktu yang sama, sehingga pergeseran fase tidak pernah lebih dari  $90^\circ$ . Spektrum sinyal mengalami *overlap*, tetapi tidak menyebabkan *crosstalk* antar *subcarrier* pada kanal yang berdekatan untuk pemetaan OQAM. Hal ini terjadi karena adanya penundaan simbol setengah waktu di antara komponen *quadrature* dan *in-phase* pada *subcarrier* [3]. Selain itu, sistem juga akan meminimalkan efek ICI dengan adanya pengurangan jarak di antara kanal yang berdekatan pada tiap *subcarrier*. Penerapan pemetaan OQAM pada sistem GFDM lebih baik daripada QAM. Manfaat dari GFDM/OQAM dapat memenuhi persyaratan aplikasi dengan pesat data yang tinggi dan bebas ICI.

Penelitian tentang OQAM pada GFDM masih sedikit dilakukan. Penerapan GFDM/OQAM pada kanal Rician dan Rayleigh telah dilakukan [3]-[12]. Penerapan GFDM pada berbagai bidang juga telah diteliti [13]-[18]. Akan tetapi, penelitian tersebut belum membahas analisis kinerja sistem pada kanal Rayleigh. Selain itu, parameter yang diteliti hanya sedikit. Kontribusi penelitian ini adalah membandingkan kinerja GFDM/QAM dengan GFDM/OQAM yang dilewatkan kanal AWGN dan kanal Rayleigh. Berdasarkan literatur yang ada, belum ada artikel tentang kinerja GFDM pada kedua sistem di jurnal nasional. Oleh karena itu, penelitian ini sangat penting dilakukan. Kontribusi selanjutnya adalah membandingkan kinerja kedua sistem untuk parameter BER,



Gambar 1. Diagram blok GFDM/OQAM.

diagram konstelasi, dan spektrum sinyal. Selain itu, juga diamati pengaruh *roll-off factor* ( $\alpha$ ) terhadap kinerja GFDM.

Organisasi makalah ini adalah sebagai berikut: bagian kedua membahas tentang model GFDM/QAM dan GFDM/OQAM, sedangkan bagian ketiga membahas tentang penurunan rumus BER yang dilewatkan pada saluran AWGN dan Rayleigh. Selanjutnya, hasil dan diskusi disajikan di bagian keempat dan bagian kelima adalah kesimpulan.

II. MODEL SISTEM

GFDM adalah sistem *multicarrier* yang menggunakan *pulse shaping* bersifat fleksibel. GFDM adalah kandidat bentuk gelombang masa depan yang menggunakan OFDM, tetapi keluaran GFDM diperoleh dengan menjumlahkan beberapa sinyal pembawa data dengan *subcarrier* dan subsimbol tertentu. GFDM adalah sistem modulasi berbentuk blok, yang terdiri atas beberapa subsimbol dan *subcarrier*. Setiap *subcarrier* disaring dengan filter prototipe yang mengalami pergeseran secara sirkular pada domain frekuensi dan waktu. Teknik ini dapat menurunkan OOB, meningkatkan efisiensi spektrum, serta meminimalkan *intersymbol interference* (ISI) dan ICI [1].

GFDM memiliki OOB yang rendah, sehingga dapat mengatasi kelemahan OFDM. Hal ini terjadi karena GFDM dipengaruhi oleh penerapan filter *pulse shaping* pada setiap *subcarrier*. GFDM juga mempunyai *cyclic prefix* (CP) untuk meminimalkan ISI ketika dilewatkan pada saluran *multipath*. Struktur GFDM yang sederhana menyebabkan sinkronisasi menjadi lebih mudah dan dapat mengurangi penggunaan energi [19].

Gambar 1 adalah diagram blok sistem GFDM/OQAM. Sinyal informasi masukan berupa deretan data biner  $\vec{b}$  diubah menjadi data kode  $\vec{b}_c$ . Data tersebut kemudian dipetakan ke dalam blok pemeta (*mapper*) menjadi deretan simbol. Pemeta yang diterapkan adalah QAM dan OQAM. *M*-ary QAM mempunyai kombinasi yang berbeda sebanyak *M* dari bit data sejumlah *n*. Keluaran dari pemetaan QAM dan OQAM disebut vektor data  $\vec{d}$ , yang dapat dideskripsikan juga sebagai  $\vec{d} = d_0, d_1, \dots, d_{N-1}$ , dengan *N* merupakan jumlah semua simbol. Kemudian, vektor data diganti menjadi data berkecepatan kecil dan akan diuraikan menjadi GFDM berukuran  $K \times M$ , dengan variabel *K* adalah jumlah *subcarrier* dan *M* adalah subsimbol pada GFDM [7]. Maka, vektor hasil proses tersebut dapat direpresentasikan dengan  $\vec{d} = d_{0,0}, d_{1,0}, \dots, d_{K-1,M-1}$ .

Komponen pada GFDM/OQAM sama dengan GFDM/QAM dengan sedikit perbedaan. Perbedaan ada pada pergeseran sampel antara komponen *in-phase* dan *quadrature* sebesar  $K/2$  pada data kompleks di domain waktu untuk pemetaan QAM. Pemeta OQAM yang baik dapat mengurangi efisiensi ICI/ISI.

Penggunaan simbol data *baseband* kompleks pada sistem GFDM/QAM adalah simbol data *real* yang dimodulasi oleh OQAM yang dikirimkan ke setiap *subcarrier* dengan sintesis fungsi basis yang berasal dari fungsi prototipe versi *time-frequency* dengan (1) [4].

$$g_{k,m}(n) = g \left[ \left( n - \frac{mK}{2} \right) \bmod KM \right] e^{\frac{j2\pi k}{K} \left[ n - \frac{L_p-1}{2} \right]} \quad (1)$$

dengan  $n = 0, 1, \dots, KM - 1$  dan  $g_{k,m}(n)$  merupakan fungsi prototipe  $g(n)$  yang bergeser melingkar di domain frekuensi dan waktu. Bentuk eksponensial kompleks menggunakan komponen fase yang memiliki penundaan dan juga mengalami operasi perputaran.  $L_p$  merupakan panjang fungsi prototipe. Proses superposisi untuk data yang dikirimkan berbentuk waktu diskret. Keluaran GFDM/OQAM dapat disajikan pada (2) [20].

$$x(n) = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{m=0}^{M-1} a_k(m) g_{k,m}(n) e^{j\phi_{m,k}} \quad (2)$$

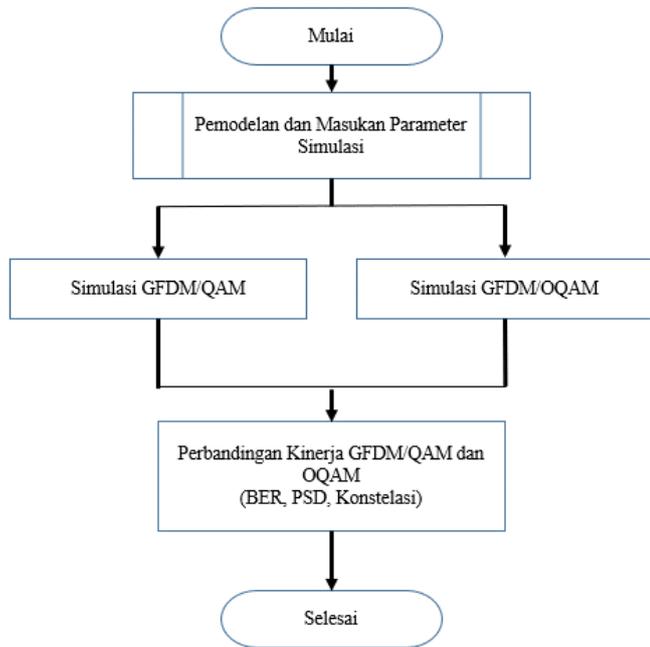
dengan  $n = 0, 1, \dots, KM - 1$ ;  $a_k(m)$  merupakan data berbentuk kompleks keluaran pemetaan QAM dan  $\phi_{m,k} = \frac{(k+m)\pi}{2}$ .  $e^{j\phi_{m,k}}$  menunjukkan perbedaan fase sebesar  $\pi/2$  antar data  $a_k(m)$ .

Sinyal yang diterima di sisi penerima setelah melewati kanal nirkabel dapat dituliskan pada (3) [1].

$$r = Hx + w \quad (3)$$

Dengan  $H = \text{circ}\{\hat{h}\}$  merupakan matriks kanal konvolusi berbentuk sirkular;  $\hat{h}$  merupakan *zero padding* dari  $h$  yang sejenis dengan  $x$ ;  $w \sim \mathcal{C}\mathcal{N}(0, \sigma_w^2 I_{KM})$  adalah derau AWGN dengan perbedaan varians  $\sigma_w^2$ ; dan  $I_{KM}$  adalah matriks identitas dengan orde  $KM$ . Bentuk  $r(n)$  dapat dituliskan sebagai  $r(n) = x(n) * h(n) + w(n)$ , dengan  $*$  adalah proses konvolusi dan  $h(n)$  merupakan tanggapan impuls pada kanal *fading*. Matriks kanal AWGN dituliskan sebagai  $h(n) = 1$ , yang sama dengan  $H = I$ .

Langkah pertama di sisi penerima adalah menghilangkan CP yang sudah ditambahkan pada pemancar. Akibatnya, hanya tersisa simbol informasi yang sebenarnya saja. Setelah CP dihapus, selanjutnya dilakukan *fast Fourier transform* (FFT) untuk mengubah data dari domain waktu ke domain frekuensi dan memisahkan sinyal informasi dari sinyal pembawa. Proses ini adalah proses demodulasi dan merupakan kebalikan dari *inverse fast Fourier transform* (IFFT). Proses demodulasi pada 16-QAM merupakan proses kebalikan dari modulasi 16-QAM. Proses demodulasi pada 16-QAM bertujuan untuk mengonversi runtun simbol GFDM kembali menjadi bit-bit data asli yang dikirimkan [7]. Nilai BER adalah rasio kesalahan bit antara yang diterima di sisi penerima terhadap bit informasi awal pada pemancar. Pada penelitian ini, metode yang digunakan adalah *zero forcing* (ZF), yang ditunjukkan pada (4).



Gambar 2. Diagram alir penelitian.

Metode ini dilakukan dengan membuat matriks identitas  $\mathbf{I}$  dan membentuk matriks  $\mathbf{A}^+$ , dengan  $\mathbf{A}^+\mathbf{A} = \mathbf{I}$ . Matriks  $\mathbf{A}^+ = (\mathbf{A}^H\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^H$  dapat dinotasikan sebagai  $\mathbf{A}^+ = \mathbf{A}^H(\mathbf{A}\mathbf{A}^H)^{-1}$  [1].

$$d_{ZF} = \mathbf{A}^+y. \quad (4)$$

### III. ANALISIS KINERJA

Pada bagian ini dibahas analisis kinerja kedua sistem. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 2, sedangkan bentuk matematis sinyal 16-QAM direpresentasikan dalam (5).

$$S(t) = \sqrt{\frac{2E_{min}}{T_s}} I(t) \cos[2\pi f_o t] - \sqrt{\frac{2E_{min}}{T_s}} Q(t) \sin[2\pi f_o t] \quad (5)$$

dengan  $E_{min}$  merupakan energi sinyal yang mempunyai amplitudo terendah dan  $a_i$  serta  $b_i$  adalah bilangan bulat yang dipilih sesuai dengan posisi sinyal. Nilai  $I(t)$  adalah  $\pm 1$  dan  $Q(t)$  adalah  $\pm 3$ .  $I(t)$  dan  $Q(t)$  merupakan elemen matriks berukuran  $L \times L$ . Nilai  $I(t)$  dan  $Q(t)$  ditunjukkan pada (6) dengan nilai  $L = \sqrt{M}$ , untuk modulasi 16-QAM ( $M = 16, L = 4$ ).

$$(I(t), Q(t)) = \begin{bmatrix} (-3,3) & (-1,3) & (1,3) & (3,3) \\ (-3,1) & (-1,1) & (1,1) & (3,1) \\ (-3,-1) & (-1,-1) & (1,-1) & (3,-1) \\ (-3,-3) & (-1,-3) & (1,-3) & (3,-3) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Pada bagian ini dijelaskan secara analitik kinerja QAM dan GFDM/OQAM. Pada kanal *flat fading*, nilai *noise enhancement factor* (NER) ditunjukkan pada (7) [2].

$$\zeta = \sum_{n=0}^{KM-1} | [d_{ZF}]_{k,n} |^2 \quad (7)$$

dengan nilai  $\zeta$  sama untuk semua nilai  $k$ .

Nilai *symbol error rate* (SER) GFDM/OQAM untuk kanal AWGN dinotasikan pada (8) [2].

$$p_{AWGN}(e) = 2 \left( \frac{k-1}{k} \right) \text{erfc}(\sqrt{\gamma}) - \left( \frac{k-1}{k} \right) \text{erfc}^2(\sqrt{\gamma}). \quad (8)$$

*Signal-to-noise ratio* (SNR) sistem GFDM/OQAM memiliki bentuk seperti pada (9) dan (10).

$$\gamma = \frac{3R_T}{2(2^\mu - 1)} \cdot \frac{N_s E_s}{\zeta N_o} \quad (9)$$

TABEL I  
PARAMETER SIMULASI

Parameter	Notasi	GFDM
Subcarrier	$K$	5
Subsimbol	$M$	9
Pulse shaping	$g$	Root raised cosined
Roll-off factor	$\alpha$	0,0,3;0,5;1
Pemetaan		16 QAM dan 16 OQAM

dan

$$R_T = \frac{KM}{KM + N_{CP} + N_{CS}} \quad (10)$$

dengan  $\mu$  adalah jumlah bit per simbol QAM,  $k = \sqrt{2^\mu}$ ,  $N_{CP}$  adalah panjang awalan siklik dan akhiran siklik  $N_{CS}$ ,  $K$  dan  $M$  mewakili jumlah *subcarrier* dan subsimbol,  $E_s$  adalah energi rata-rata per simbol, dan  $N_o$  adalah rapat daya derau. Faktor  $N_s$  memiliki nilai 2 untuk OQAM dan 1 untuk QAM.

Nilai SER GFDM/OQAM untuk kanal Rayleigh dituliskan pada (11) [2].

$$p_{RAY}(e) = 2 \left( \frac{p-1}{p} \right) \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_r}{1 + \bar{\gamma}_r}} \right) - \left( \frac{p-1}{p} \right)^2 \left[ 1 - \frac{4}{\pi} \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_r}{1 + \bar{\gamma}_r}} \arctan \left( \sqrt{\frac{1 + \bar{\gamma}_r}{\bar{\gamma}_r}} \right) \right] \quad (11)$$

dengan  $\bar{\gamma}_r$  adalah SNR pada kanal Rayleigh;  $\bar{\gamma}_r = \frac{3R_T \sigma_r^2}{(2^\mu - 1)} \cdot \frac{N_s E_s}{\zeta N_o}$  dan  $\sigma_{ray}^2 = \sigma_r^2 \sum_{j=0}^{N_{ch}-1} |h_j|^2$ ;  $h$  adalah tanggapan impuls kanal dengan panjang  $N_{ch}$ , dan  $\sigma_r^2 = 1/2$  parameter *tap* Rayleigh yang terdistribusi berdasarkan kinerja SER.

### IV. HASIL DAN DISKUSI

Pada bagian ini disajikan hasil investigasi menggunakan simulasi pada sistem GFDM/OQAM dan QAM. Perbandingan kinerja sistem GFDM/OQAM dan GFDM/QAM dapat dianalisis setelah program berhasil dijalankan. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB R2015a.

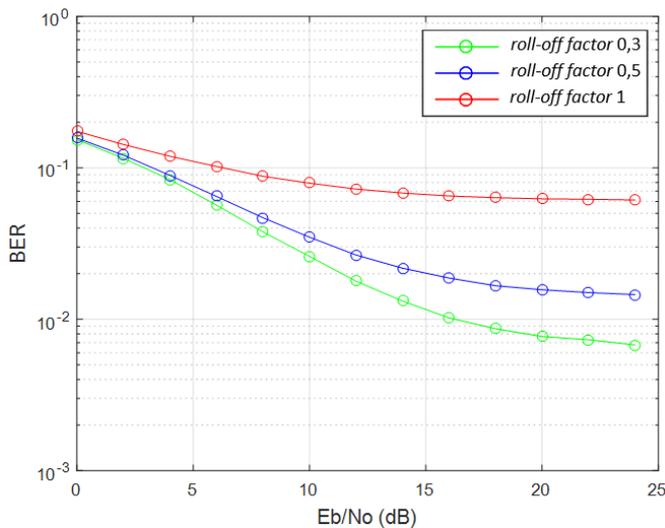
Penelitian ini menggunakan pemodelan seperti Gambar 1, yaitu sistem GFDM/QAM dan OQAM. Tabel I menunjukkan parameter-parameter yang digunakan dalam simulasi ini.

#### A. HASIL SIMULASI GFDM/QAM PADA SALURAN AWGN

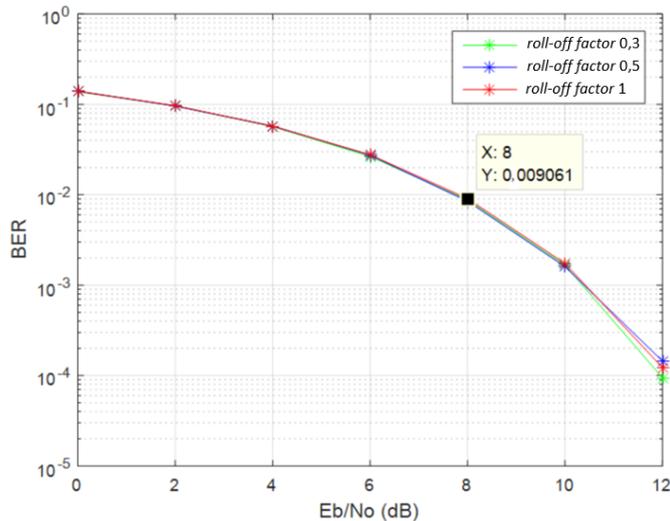
Pada bagian ini disimulasikan GFDM/QAM dengan variasi nilai *roll-off factor* ( $\alpha$ ), yaitu 0,3; 0,5; dan 1, ketika dilewatkan pada saluran AWGN. Perbandingan BER pada GFDM/QAM dengan variasi  $\alpha$  ditunjukkan pada Gambar 3.

Hasil simulasi sistem GFDM/QAM adalah sebagai berikut. Untuk nilai  $\alpha = 0,3$ , didapatkan sistem dengan  $E_b/N_o$  10 dB memiliki kinerja BER 0,025; pada sistem dengan nilai  $\alpha = 0,5$ , dihasilkan BER 0,035; dan untuk  $\alpha = 1$ , diperoleh BER sebesar 0,07.

Sistem GFDM/QAM dengan hasil kinerja terbaik menggunakan nilai  $\alpha = 0,3$ , sedangkan kinerja sistem terendah diperoleh pada nilai  $\alpha = 1$ . Pemilihan nilai *pulse shaping* pada GFDM/QAM menjadi penyebab hal tersebut. Berdasarkan hasil pada Gambar 3, makin besar nilai  $\alpha$  (atau mendekati 1), makin tinggi nilai BER, yang berarti kinerja sistem makin menurun. Penyebabnya adalah adanya *overlap* spektrum antar *subcarrier*. *Overlap* antar *subcarrier* ini akan menghasilkan interferensi yang memengaruhi besarnya nilai *error* di penerima, sehingga nilai BER makin besar.



Gambar 3. Perbandingan BER dari GFDM/QAM yang dilewatkan saluran AWGN.



Gambar 4. Grafik BER GFDM/OQAM yang dilewatkan saluran AWGN.

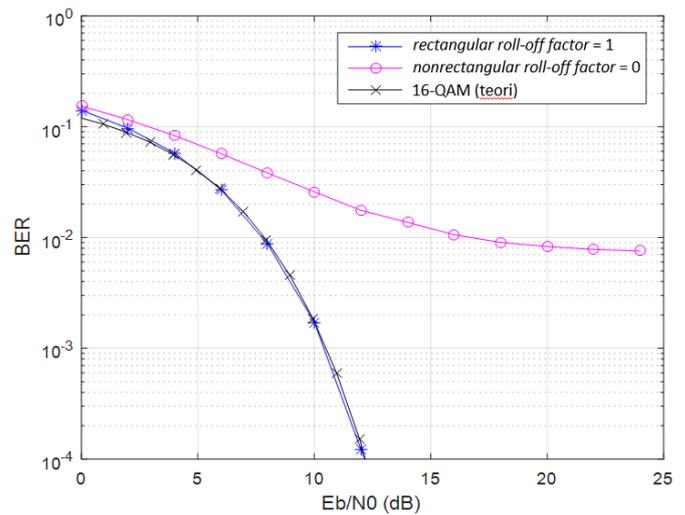
**B. HASIL SIMULASI GFDM/OQAM PADA SALURAN AWGN**

BER dalam sistem GFDM/OQAM yang dilewatkan pada saluran AWGN disajikan pada Gambar 4, dengan variasi nilai  $\alpha$  sama dengan simulasi sebelumnya, sebesar 0,3; 0,5; dan 1. Pada simulasi ini, dibuat kurva perbandingan antara GFDM/QAM, GFDM/OQAM, OFDM, dan 16-QAM (teori) yang ditampilkan pada Gambar 5.

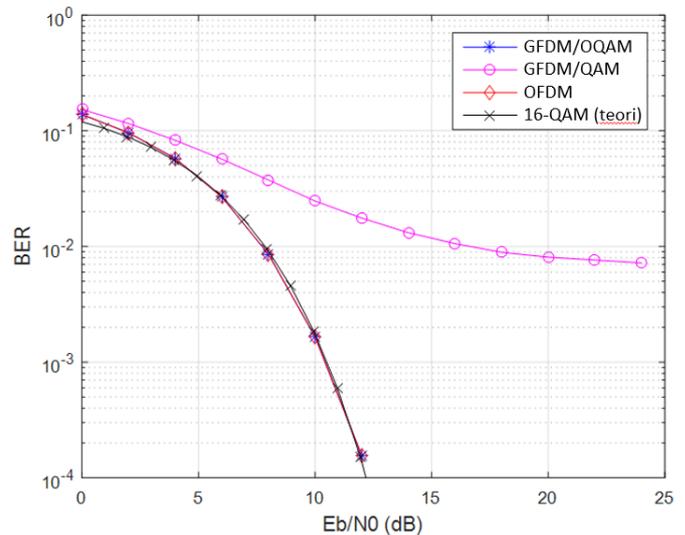
Simulasi sistem GFDM/OQAM dengan variasi nilai  $\alpha$ , yaitu 0,3; 0,5; dan 1, menghasilkan kurva BER hampir sama. Berbeda dengan GFDM/QAM, sistem GFDM/OQAM mempunyai kinerja yang lebih bagus untuk semua nilai  $\alpha$ . Misalnya, untuk memperoleh nilai BER 10<sup>-3</sup>, dibutuhkan nilai  $E_b/N_0$  sebesar 11 dB. Maka, dapat ditarik kesimpulan bahwa pemilihan nilai  $\alpha$  lebih dari 0 pada sistem GFDM/OQAM menghasilkan kinerja yang lebih baik.

**C. PERBANDINGAN BER GFDM/QAM DENGAN PULSE SHAPING RECTANGULAR DAN NONRECTANGULAR PADA AWGN**

Parameter pemodelan yang digunakan di sini masih sama seperti parameter sebelumnya. Pada bagian ini diinvestigasi sistem GFDM/QAM dengan nilai  $\alpha$  yang bervariasi dari 0 dan 1. Nilai  $\alpha = 0$  menunjukkan *pulse shaping* berbentuk *rectangular* atau kotak, sedangkan  $\alpha = 1$  menunjukkan *pulse*



Gambar 5. Perbandingan BER sistem GFDM/QAM dengan *pulse shaping* *rectangular* dan *nonrectangular*.

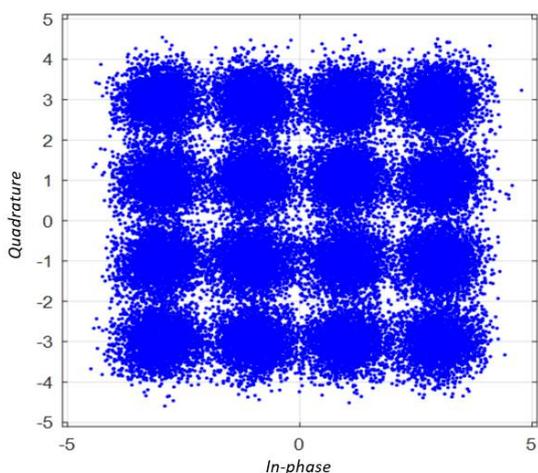


Gambar 6. Perbandingan BER GFDM/OQAM dan QAM yang dilewatkan saluran AWGN ( $\alpha = 0,3$ ).

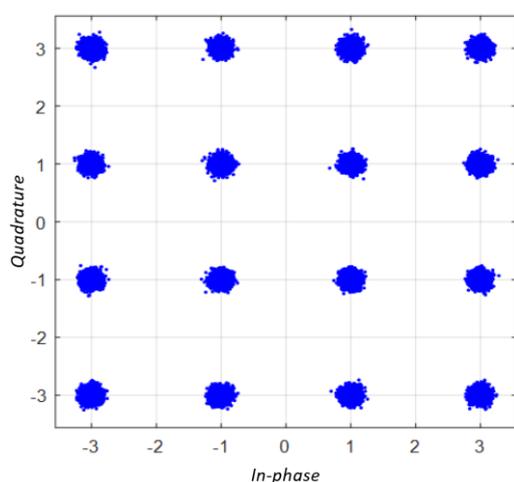
*shaping* berbentuk *nonrectangular* atau bukan kotak. BER sistem GFDM/QAM diperoleh dari perbandingan kedua nilai *roll-off factor* tersebut. Grafik nilai BER terhadap  $E_b/N_0$  ditunjukkan pada Gambar 5.

Pada Gambar 5 terlihat bahwa penggunaan *rectangular pulse* pada sistem GFDM/QAM dengan nilai  $E_b/N_0$  10 dB menghasilkan BER 0,0016, sedangkan penggunaan *pulse shaping* berbentuk *nonrectangular pulse* menghasilkan kinerja 0,0249. Hal ini menunjukkan bahwa BER pada GFDM/QAM dengan *pulse shaping* berbentuk *rectangular* lebih baik daripada GFDM/QAM yang menggunakan *pulse shaping* berbentuk *nonrectangular*.

Dari penelitian ini dapat diketahui bahwa kinerja BER pada GFDM/QAM dengan *pulse shaping* berbentuk *rectangular* lebih baik jika dibandingkan dengan sistem GFDM/QAM yang berbentuk *non rectangular*. Nilai BER mengalami penurunan sampai 99,99% pada  $E_b/N_0$  sebesar 15 dB. Ketika sistem GFDM/QAM menggunakan *pulse shaping* berbentuk *root raised cosine* atau *nonrectangular*, sinyal keluaran akan kehilangan ortogonalitasnya. Agar tercapai BER yang lebih baik, sistem sebaiknya menggunakan  $\alpha = 0$  atau *rectangular pulse*. Hal ini dilakukan agar ortogonalitas sinyal dapat terjaga, sehingga dapat menghindari adanya interferensi antar *subcarrier*.



Gambar 7. Diagram konstelasi sistem GFDM/QAM.



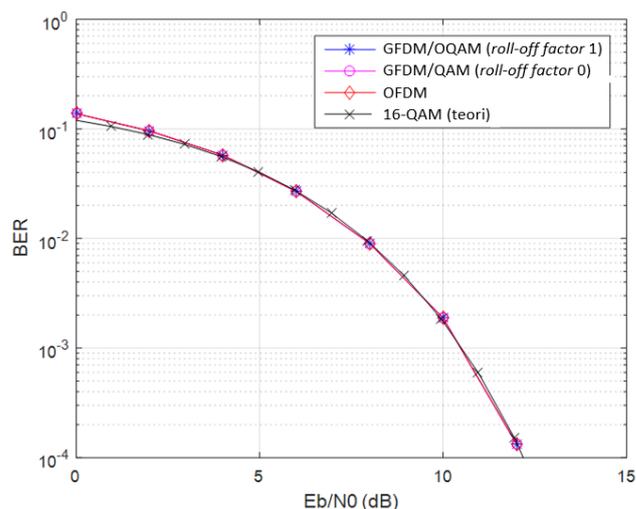
Gambar 8. Scatter plot sistem GFDM/OQAM.

#### D. PERBANDINGAN BER GFDM/OQAM PULSE SHAPING RECTANGULAR DAN NONRECTANGULAR PADA AWGN

Pada bagian sebelumnya telah dilakukan pengamatan kinerja BER ketika dilewatkan pada saluran AWGN dengan modulasi yang berbeda berdasarkan pemilihan nilai *roll-off factor*. Pada bagian ini, dilakukan penyelidikan melalui simulasi sistem GFDM/OQAM dibandingkan GFDM/QAM dengan nilai  $\alpha$  sebesar 0,3. Nilai BER dari kedua sistem GFDM telah diperoleh. Nilai BER dan  $E_b/N_0$  sistem GFDM dengan  $\alpha = 0,3$  ditunjukkan pada Gambar 6.

Gambar 6 memperlihatkan bahwa kuva BER pada GFDM/OQAM lebih baik daripada GFDM/QAM. Untuk memperoleh BER 0,0013, diperlukan nilai  $E_b/N_0$  10 dB pada sistem GFDM/OQAM, sedangkan pada sistem GFDM/QAM diperoleh BER 0,024 untuk nilai  $E_b/N_0$  yang sama. Dapat disimpulkan bahwa untuk nilai  $\alpha = 0,3$ , BER sistem GFDM/OQAM lebih baik dibandingkan dengan BER sistem GFDM/QAM. Besarnya nilai  $E_b/N_0$  berpengaruh pada sistem GFDM, yaitu makin besar nilai  $E_b/N_0$ , makin kecil nilai BER yang diperoleh. Jika daya derau makin besar, nilai  $E_b/N_0$  akan makin kecil, yang akan menyebabkan bit yang diterima salah makin banyak. Maka, bisa disimpulkan bahwa kinerja BER GFDM/OQAM lebih bagus daripada BER GFDM/QAM. Penurunan BER dari GFDM/QAM ke GFDM/OQAM dapat mencapai 99,96% untuk nilai  $E_b/N_0$  15 dB [7].

Scatter plot atau diagram konstelasi hasil simulasi dari GFDM/OQAM dan GFDM/QAM ditunjukkan pada Gambar 7



Gambar 9. BER pada GFDM/OQAM ( $\alpha = 1$ ) dan GFDM/QAM ( $\alpha = 0$ ).

dan Gambar 8. Diagram konstelasi bermanfaat untuk mengetahui area deteksi simbol di sisi penerima sistem GFDM.

Diagram konstelasi untuk simbol-simbol pada sistem GFDM/OQAM terlihat berdekatan satu sama lain. Simbol-simbol tersebut berada di wilayah *decision area*. Sementara itu, pada diagram konstelasi GFDM/QAM terlihat bahwa simbol-simbol menyebar di semua titik dan jatuh meleset di wilayah deteksi simbol pada penerima. Akibatnya adalah nilai BER menjadi tidak 0.

#### E. PERBANDINGAN GFDM/OQAM DAN GFDM/QAM PADA KANAL AWGN DENGAN VARIASI $\alpha$

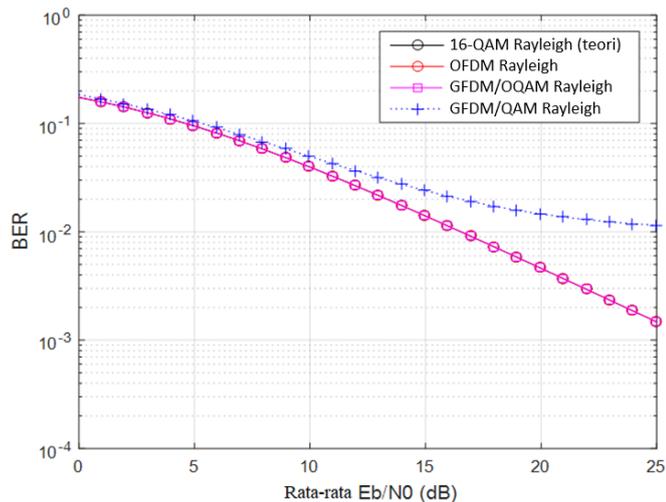
Bagian ini menyelidiki kinerja GFDM/QAM dan GFDM/OQAM menggunakan variasi nilai  $\alpha = 0$  pada QAM dan  $\alpha = 1$  pada OQAM. Nilai  $\alpha = 0$  artinya digunakan *pulse shaping* berbentuk *rectangular*, sedangkan nilai  $\alpha = 1$  artinya digunakan *pulse shaping* berbentuk *nonrectangular*. BER yang diperoleh dari kedua nilai  $\alpha$  atau *pulse shaping* yang berbeda tersebut lalu dibandingkan. Hasil simulasi BER terhadap  $E_b/N_0$  kedua sistem tersebut ditunjukkan pada Gambar 9.

Gambar 9 memperlihatkan bahwa sistem GFDM/QAM dengan *pulse shaping* berbentuk *rectangular* dan GFDM/OQAM dengan *pulse shaping* berbentuk *nonrectangular* memiliki nilai  $E_b/N_0$  yang relatif sama. Untuk memperoleh BER  $10^{-2}$  pada GFDM/OQAM dan QAM diperlukan  $E_b/N_0$  sebesar 8 dB. Maka, dapat diketahui bahwa jika digunakan *pulse shaping* berbentuk *nonrectangular*, perlu digunakan pemetaan OQAM agar tidak timbul interferensi di antara *subcarrier*, sehingga ortogonalitas dapat terjaga. BER sistem GFDM/QAM yang menggunakan *pulse shaping* berbentuk *rectangular* sama baik dengan GFDM/OQAM yang menggunakan *pulse shaping* berbentuk *nonrectangular*.

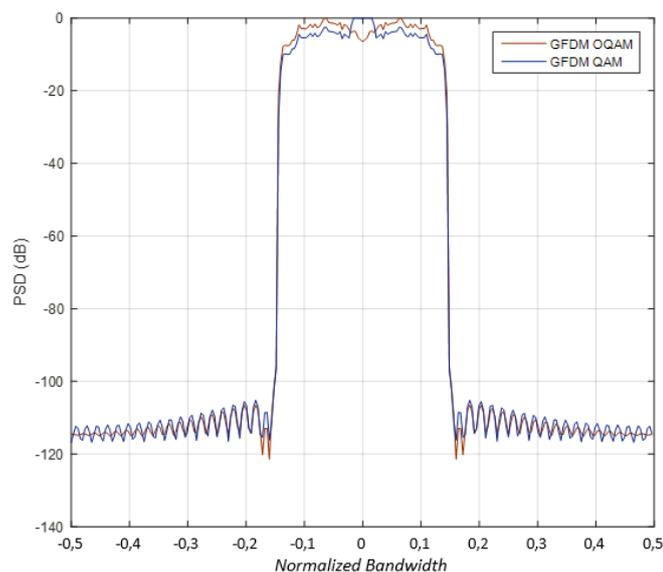
#### F. PERBANDINGAN GFDM/OQAM DAN QAM YANG DILEWATKAN SALURAN RAYLEIGH FADING

Setelah simulasi untuk memperoleh BER sistem GFDM pada saluran AWGN, selanjutnya dilakukan simulasi untuk memperoleh BER pada saluran *Rayleigh fading*. Sama seperti simulasi pada saluran AWGN, sistem GFDM/OQAM dan QAM disimulasikan menggunakan variasi nilai  $\alpha$ , yaitu 0,3; 0,5; dan 1. Selanjutnya, dilakukan perbandingan BER yang diperoleh pada kedua skenario tersebut. BER terhadap  $E_b/N_0$  hasil simulasi pada GFDM dengan nilai  $\alpha=1$  ditunjukkan pada Gambar 10.

Pada Gambar 10 terlihat bahwa nilai BER pada GFDM/OQAM lebih baik daripada GFDM/QAM. Ketika nilai



Gambar 10. Perbandingan BER GFDM/OQAM dan GFDM/QAM pada saluran Rayleigh untuk  $\alpha = 1$ .



Gambar 11. Power Spectral Density pada sistem GFDM/OQAM dan GFDM/QAM.

$E_b/N_0$  sebesar 20 dB, sistem GFDM/OQAM memperoleh BER sebesar 0,16, sedangkan pada sistem GFDM/QAM diperoleh BER sebesar 0,18. Dapat disimpulkan bahwa kinerja GFDM/OQAM pada saluran Rayleigh ketika nilai  $\alpha = 1$  lebih baik daripada GFDM/QAM.

### G. ANALISIS POWER SPECTRAL DENSITY

Bagian ini menganalisis parameter spektrum sinyal pada simulasi kedua sistem yang ditunjukkan pada Gambar 11. Rapat spektrum (*spectral density*) sinyal adalah distribusi daya sinyal di kawasan frekuensi. Hal ini sangat signifikan untuk memahami sistem penyaringan di sistem komunikasi nirkabel. *Power spectral density* (PSD) digunakan untuk mengevaluasi sinyal atau derau pada keluaran filter [7].

FFT mengubah sinyal ke dalam domain frekuensi untuk mengamati PSD sinyal informasi yang dikirimkan. Metode Welch digunakan untuk mengamati PSD. Kurva PSD sistem GFDM pada Gambar 10 menunjukkan bahwa GFDM/OQAM mempunyai *sidelobe* dan emisi *out of band* yang lebih kecil daripada GFDM/QAM. Nilai redaman untuk GFDM/OQAM bernilai sekitar -7 dB di bawah sinyal GFDM/QAM. Hal ini terjadi karena pada sistem OQAM terdapat penundaan simbol setengah waktu di antara komponen *quadrature* dan *in-phase*

pada *subcarrier*. Selain itu, OQAM juga meminimalkan efek ICI dengan adanya pengurangan jarak di antara kanal yang berdekatan pada setiap *subcarrier*.

### V. KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah berhasil dibandingkan kinerja sistem GFDM dengan QAM dan OQAM. Selain itu, juga telah diselidiki kinerja kedua sistem untuk parameter BER, diagram konstelasi, dan spektrum sinyal. Kelebihan GFDM/OQAM dibandingkan GFDM/QAM adalah komponen *quadrature* dan *in-phase* pada modulasi OQAM tidak mengalami pergeseran pada slot waktu yang sama. Selain itu, GFDM/OQAM memiliki OOB yang rendah, pesat data yang tinggi, dan bebas ICI. Faktor nilai *roll-off factor* sangat memengaruhi kinerja pada sistem GFDM. Jika nilai  $\alpha$  makin tinggi, nilai BER juga akan makin tinggi. Penelitian ini berhasil mendapatkan acuan nilai *roll-off factor* yang dapat digunakan pada penerapan sistem GFDM/OQAM dengan hasil kinerja terbaik yaitu 0,3. Penelitian selanjutnya adalah menyelidiki MIMO-GFDM yang menggunakan pemetaan QAM dan OQAM pada saluran AWGN dan Rayleigh.

### KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan.

### KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Ari Endang Jayati dan Budiani Desyningtias; metodologi, Ari Endang Jayati; perangkat lunak, Ari Endang Jayati; validasi, Ari Endang Jayati, Budiani Desyningtias; analisis formal, Ari Endang Jayati; investigasi, Ari Endang Jayati; sumber daya, Ari Endang Jayati; kurasi data, Ari Endang Jayati; penulisan—penyusunan draf asli, Ari Endang Jayati; penulisan—peninjauan dan penyuntingan, Ari Endang Jayati; visualisasi, Ari Endang Jayati; pengawasan, Ari Endang Jayati; administrasi proyek, Ari Endang Jayati; akuisisi pendanaan, Budiani Desyningtias.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada LPPM Universitas Semarang yang telah membiayai penelitian ini.

### REFERENSI

- [1] N. Michailow dkk., "Generalized Frequency Division Multiplexing: A Flexible Multi-Carrier Modulation Scheme for 5th Generation Cellular Networks," dipresentasikan di *German Microwave Conference (GeMic)*, Ilmenau, Germany, 12-14 Mar. 2012.
- [2] S.K. Bandari, V.V. Mani, dan A. Drosopoulos, "OQAM Implementation of GFDM," *2016 23rd Int. Conf. Telecommun. (ICT)*, 2016, hal. 1-5, doi: 10.1109/ICT.2016.7500463.
- [3] S. Randel, dkk., "Study of Multicarrier Offset-QAM for Spectrally Efficient Coherent Optical Communications," *2011 37th Eur. Conf., Exhib. Opt. Commun.*, 2011, hal 5-11.
- [4] S.K. Bandari, V.V. Mani, dan A. Drosopoulos, "GFDM/OQAM Implementation under Rician Fading Channel," *2016 Int. Conf. Adv. Comput., Commun., Inform. (ICACCI)*, 2016, hal. 256-260, doi: 10.1109/ICACCI.2016.7732056.
- [5] I. Gaspar dkk., "Frequency-Shift Offset-QAM for GFDM," *IEEE Commun. Lett.*, Vol. 19, No. 8, hal. 1454-1457, Agu. 2015, doi: 10.1109/LCOMM.2015.2445334.
- [6] A.E. Jayati, Wirawan, T. Suryani, dan Endroyono, "Teknik Mitigasi Efek Nonlinieritas High Power Amplifier (HPA) pada Multiple Input Multiple Output (MIMO) Generalized Frequency Division Multiplexing (GFDM)," Disertasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia, 2021.
- [7] A.E. Jayati, Wirawan, T. Suryani, dan Endroyono, "Nonlinear Distortion Cancellation Using Predistorter in MIMO-GFDM Systems," *Electron.*, Vol. 8, No. 6, hal. 1-19, Jun. 2019, doi: 10.3390/electronics8060620.
- [8] A.E. Jayati, Wirawan, Wirawan, dan T. Suryani, "Analysis of Non-Linear Distortion Effect Based on Saleh Model in GFDM System." *2017 IEEE*

- Int. Conf. Commun. Netw., Satell. (COMNETSAT)*, 2017, hal. 1–6, doi: 10.1109/COMNETSAT.2017.8263564.
- [9] A.E. Jayati dan B. Destyningtias, “The Analysis of the High Power Amplifier Distortion on the MIMO-GFDM System,” *2021 IEEE Int. Conf. Commun. Netw., Satell. (COMNETSAT)*, 2021, hal. 252-257, doi: 10.1109/COMNETSAT53002.2021.9530796.
- [10] F.H. Ramadiansyah, T. Suryani, dan Suwadi, “Perbaikan Kinerja Sistem Generalized Frequency Division Multiplexing dengan Menggunakan Offset Quadrature Amplitude Modulation,” Tugas akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia, 2017.
- [11] N. Michailow dkk., “Generalized Frequency Division Multiplexing for 5th Generation Cellular Networks,” *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 62, No. 9, hal. 3045–3061, Sep. 2014, doi: 10.1109/TCOMM.2014.2345566.
- [12] S.K. Antapurkar, A. Pandey, dan K.K. Gupta, “GFDM Performance in Terms of BER, PAPR and OOB and Comparison to OFDM System,” *AIP Conf. Proc.*, Vol. 1715, No. 1, hal. 1-11, 2016, doi: 10.1063/1.4942721.
- [13] S.S.K.C. Bulusu, H. Shaïek, dan D. Roviras, “HPA Linearization for Next Generation Broadcasting Systems with Fast Convergence-Digital Predistortion,” *IEEE Trans. Broadcast.*, Vol. 67, No. 3, hal. 776-790, Sep. 2021, doi: 10.1109/TBC.2021.3081925.
- [14] G. Qiao dkk., “Low-Complexity Progressive MIMO-OFDM Receiver for Underwater Acoustic Communication,” *Symmetry*, Vol. 11, No. 3, hal. 1-16, Mar. 2019, doi:10.3390/sym11030362.
- [15] A. Mohammadian, A. Mohammadi, A. Abdipour, dan M. Baghani, “Spectral Analysis of GFDM Modulated Signal under Nonlinear Behavior of Power Amplifier,” *Wirel. Netw.*, Vol. 27, hal. 137–149, Agu. 2021, doi: 10.1007/s11276-020-02403-2.
- [16] Z.A. Sim dkk., “Performance of GFDM Systems Using Quadratic Programming Pulse Shaping Filter Design,” *IEEE Access*, Vol. 8, hal. 37134–37146, Feb. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2975430.
- [17] L.L. Mendes and H.D Rodrigues. “Inatel Prototypes GFDM Transceiver to Bring 5G to Brazilian Remote Areas in a Fraction of Time,” *IEEE Spectrum*. <https://spectrum.ieee.org/inatel-prototypes-gfdm-transceiver-to-bring-5g-to-brazilian-remote-areas-in-a-fraction-of-time>, tanggal akses: 2-Jan-2021.
- [18] V. Kumar, B. Cardiff, dan M.F. Flanagan, “Performance Analysis of NOMA with Generalized Selection Combining Receivers,” *Electron. Lett.*, Vol. 55, No. 25, hal. 1364–1367, Des. 2019, doi: 10.1049/el.2019.2948.
- [19] A.E. Jayati, Wirawan, T. Suryani, dan Endroyono, “Characteristic of HPA Nonlinear Distortion Effects in MIMO-GFDM Systems,” *2018 Int. Conf. Inf., Commun. Technol. Converg. (ICTC)*, 2018, hal. 379–384, doi: 10.1109/ICTC.2018.8539527.
- [20] A.E. Jayati dan M. Sipan, “Impact of Nonlinear Distortion with the Rapp Model on the GFDM System,” *2020 Third Int. Conf. Vocat. Educ., Elect. Eng. (ICVEE)*, 2020, hal. 1-5, doi: 10.1109/ICVEE50212.2020.9243295.